УДК 621.311.1.001.5

РАЗВИТИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ

А.С. Заворин, Ю.А. Загромов, Л.А. Беляев

Особенностью основных научных школ теплоэнергетического факультета, развивавшихся на протяжении его 80-летней истории, является органичная связь с проблемами инженерной практики.

Научные исследования стали необходимой частью образовательной деятельности с момента возникновения теплоэнергетического образования в ТПУ. Тогда же определились в качестве ведущих принципов системный подход к решению задач повышения экономичности энергопроизводства и сочетание теоретического изучения проблемных вопросов с практической реализацией новейших разработок. Такая методология обоснована многоуровневостью самой проблемы повышения тепловой эффективности в общей постановке: термодинамические и теплофизические процессы, функциональность и надежность основного и вспомогательного оборудования, переменные режимы эксплуатации, коммуникации систем теплоснабжения и др.

Главная заслуга в постановке направлений, вокруг которых сформировались научные школы теплоэнергетического факультета, принадлежит профессору И.Н. Бутакову. Целенаправленная научная деятельность в области теплоэнергетики началась на организованной им в 1923 г. кафедре теплосиловых установок в составе механического факультета. В этот период в энергетике страны наступила пора широкого внедрения паровых турбин вместо паровых машин, а затем началось бурное развитие теплофикации и комбинированного производства энергии. И.Н. Бутаков с сотрудниками разработал методику определения КПД, основанную на уравнениях теплового баланса, и показал ее применимость для анализа переменного режима работы теплоэлектростанции и всей энергосистемы. По

своим возможностям методика И.Н. Бутакова позволяла влиять на подбор наиболее эффективных комбинаций составляющих в тепловых балансах. По сути им был предложен новый метод оптимизации энергопроизводства и энергоиспользования. Метод был успешно апробирован, когда автору пришлось участвовать в выработке решений по энергоснабжению объектов Кузбасса и по созданию в дальнейшем многих энергоемких производств. В частности, в 1926 г. на этой основе и с участием преподавателей-теплоэнергетиков решался вопрос о реконструкции Томской ТЭЦ-1.

В дальнейшем большой вклад в решение проблем теплофикации внес ученик И.Н. Бутакова профессор В.Т. Юринский, который защитил кандидатскую диссертацию на тему: "Теплотехнические основы сравнения теплосиловых установок", а в качестве темы докторской диссертации выбрал решение вопросов переменного режима в тепловых сетях.

В.Т. Юринский в традициях теплотехнической школы И.Н. Бутакова занимался не только теоретическими разработками. Так, под его руководством были выполнены расчеты и чертежи нового облопачивания проточной части реконструируемой турбины ТЭЦ-1, а в 1945 г. подготовлен проект теплофикации центральной части города Томска.

Вовлечение в хозяйственное использование местных видов топлива, которыми изобилует Сибирь, всегда было очень важной экономической задачей для развития не только самой Сибири, но и России в целом. Поэтому исследование свойств сибирских углей с ориентацией на их применение в регионе стало еще в начале прошлого века одним из научных направлений томских политехников. Однако на постоянную основу исследования по рациональному энергетическому использованию сибирских углей были поставлены в начале 20-х годов на кафедре теплосиловых установок под руководством профессора И.Н. Бутакова. Первыми крупными работами в этом направлении стали исследования теплотехнических характеристик углей Хакасии и Таймыра, участниками которых были доценты А.М. Суханов, Г.И. Фукс, ассистенты Н.И. Анастасиева, А.И. Горегляд, П.А. Мухачев, В.Н. Смиренский. Итоги изучения углей Минусинского и Таймырского бассейнов как энергетического топлива были высоко оценены в Сибкрайсовнархозе.

Сотрудники кафедры активно занимались разработкой и реализацией проектов реконструкции топочных устройств для котлов, изначально не приспособленных к сибирским углям, благодаря чему обеспечивалась их энергетическая эффективность и эксплуатационная надежность. Такие разработки выполнялись в комплексе с теплотехническими испытаниями котельных установок. К этому периоду относятся теоретические и экспериментальные исследования В.Н. Смиренского, которые значительно углубили научную основу теплотехнических испытаний котельных установок как комплексного метода и не утратили свою ценность и сегодня. Особенно востребованными работы по этой тематике были в 40-е годы, когда требовалось переводить эвакуированное в Сибирь энергетическое оборудование на другие условия эксплуатации.

Работы в области технической термодинамики и теплофизики были начаты профессором Г.И. Фуксом на организованной им в 1935 г. кафедре теоретической и общей теплотехники, где поэтапно создавались лаборатории общей теплотехники, технической термодинамики, тепломассообмена, служившие как для учебных практикумов, так и для исследовательских экспериментов. Примечательно, что научная работа кафедры продолжительный период подпитывалась прежде всего разносторонним научно-методическим опытом преподавательской практики Г.И. Фукса. В центральных журналах и в "Известиях ТПИ" им было опубликовано около двух десятков основательных статей по методическим вопросам технической термодинамики и теплопередачи, наиболее значимыми из которых являются: "КПД и давление отборов регенеративного цикла" (1945 г.), "Расчет адиабатного и политропного процессов по средним теплоемкостям" (1948 г.), "Расчет адиабатных процессов идеального газа по таблицам" (1962 г.). Около 80 опубликованных научных работ Г.И. Фукса развивают в основном вопросы термодинамической оценки степени совершенства теплосиловых установок. Современный эксергетический метод является подтверждением плодотворности идеи, заложенной в докторской диссертации Г.И. Фукса, защищенной в 1941 г.

В пятидесятые годы под руководством Г.И. Фукса начались исследования ряда проблем аналитической теории теплообмена и их прикладных приложений, которые в последующие годы плодотворно продолжены учениками и отражены в многочисленных статьях, монографиях, отчетах и диссертациях. Среди таких направлений следует выделить разработку инженерных методов теплового расчета электротехнических устройств различного назначения (А.С. Ляликов, Л.Г. Фукс), исследование тепловых процессов при нагреве однородных и неоднородных систем от высокотемпературных и концентрированных источников энергии (Г.П. Бойков, В.В. Иванов), исследование теплофизических свойств веществ (Л.Г. Фукс).

Современный уровень начатого И.Н. Бутаковым направления по энергетическому использованию сибирских углей связан с деятельностью его ученика профессора И.К. Лебедева, который положил начало исследованию влияния минеральной составляющей твердого топлива на условия работы котельных агрегатов. В 50-е и особенно в 60-е годы эти исследования в нашей стране были в числе наиболее актуальных научно-технических задач и интенсивно развивались. Такое положение объяснялось тем, что перспективы обеспечения топливно-энергетического баланса Советского Союза связы-

вались с созданием колоссальных по мощности топливно-энергетических комплексов в восточных регионах страны. Одним из них должен был стать Канско-Ачинский топливно-энергетический комплекс (КАТЭК) на базе уникальных месторождений Канско-Ачинского буроугольного бассейна. Однако надежность работы топливосжигающих установок оказалась недостаточной из-за неоднозначности теплотехнических проявлений свойств минеральной части углей. Первые крупные котлы, введенные в эксплуатацию для сжигания канско-ачинских углей, из-за интенсивного образования отложений характеризовались низкой тепловой эффективностью поверхностей нагрева и были работоспособны лишь при ограниченной до 60...70 % паропроизводительности, а полную нагрузку могли нести не более одной недели, после чего требовалась остановка для проведения чистки теплообменных поверхностей, на которую требовалось от 5 до 10 дней при трехсменной работе.

Научный коллектив кафедры котлостроения и котельных установок, включившись в решение проблемы под руководством зав. кафедрой И.К. Лебедева, внес значимый вклад в различные его аспекты. Существенно новые результаты были получены при исследовании реакционных свойств углей в условиях как высокоскоростного нагрева (Е.А. Коньков), так и низкотемпературного окисления (К.Г. Кузнецов), по всему спектру теплотехнических характеристик, включая физико-химические параметры золы, для широкого диапазона зольности угля (Н.В. Трикашный, В.Н. Смиренский, А.А. Торлопов, К.К. Сарияниди), по механизмам возникновения и эволюции натрубных термических сопротивлений золы (Г.К. Привалихин, И.И. Федецкий, А.С. Заворин), были установлены количественные оценки минералогических разновидностей в исходном состоянии угля и тенденции их трансформации при сжигании (Г.К. Закоурцев, С.К. Карякин). Принципиально важные выводы о влиянии условий топочного процесса на свойства образующихся минеральных продуктов сжигания были получены в стендовых установках (Е.А. Мосин, А.В. Левковский, Ю.В. Разваляев) и в натурных экспериментах на действующих котлоагрегатах электростанций (А.И. Гнатюк). Как обобщение выполненных исследований И.К. Лебедев обосновал принцип организации сжигания, который он назвал "методом высокотемпературной обработки золы". Реализация этого метода была связана со сжиганием угля в режиме жидкого шлакоудаления. При этом основной эффект повышения работоспособности и тепловой эффективности поверхностей нагрева обеспечивался за счет увеличения степени улавливания золы в топке, главным образом ее легкоплавкой части, и за счет связывания реакционно-активных компонентов в золе, выносимой в конвективные поверхности нагрева, с образованием нейтральных частиц.

По сути дела, доказательство возможности использования топочного процесса как активного средства воздействия на получаемые минеральные продукты сжигания канско-ачинских углей можно считать одним из главных научных достижений школы И.К. Лебедева, которое в конце 60-х - начале 70-х годов получило широкое признание. Так, Барнаульским котельным заводом с учетом рекомендаций ТПИ был сконструирован и изготовлен паровой котел БКЗ-320-140 ПТ, который показал наилучшие результаты в эксплуатации при сжигании углей Назаровского и Ирша-Бородинского месторождений. Примечательно, что этот котел в 70-е годы, в период самого начала кампании борьбы за качество, стал первым отечественным котлоагрегатом, которому был присвоен государственный Знак качества. Результаты исследований, выполненных в ТПИ, И.К. Лебедев в совместном со Всесоюзным теплотехническим институтом докладе представлял от СССР на VII Конгрессе Мировой энергетической конференции.

Следует отметить, что проблемы комбинированного производства энергии были всегда актуальны для отечественной теплоэнергетики, не утратив этого значения и до настоящего времени. В этом направлении долгое время работы проводились под руководством В.А. Брагина, сменившего И.Н. Бутакова на посту заведующего кафедрой теплоэнергетических установок. Коллективом под его руководством (В.И. Беспалов, И.Н. Коновалов, Н.Н. Галашов, А.В. Воробьев, А.Т. Мастихин) были разработаны вопросы влияния режимов работы электростанций на показатели экономичности теплоэлектроцентрали и прогнозирования расходов топлива на электростанциях и в энергосистемах. Глубокие исследования по вопросам оптимизации развития систем энергоснабжения были выполнены В.И. Беспаловым.

Проблемы комбинированного производства энергии напрямую связаны с вопросами использования низкопотенциального тепла, которые имеют важное значение не только для тепловых электростанций, но и для промышленных предприятий. Разработав методику анализа теплоэнергетических систем на основе тепловых балансов, И.Н. Бутаков открыл целое направление оптимизации, энергоиспользования, в котором в разное время плодотворно работали В.А. Брагин, В.Е. Целебровский, В.И. Подсушный.

Значительное место в решении задач повышения тепловой экономичности энергоснабжения занимает изучение характеристик существующего оборудования и разработка нового. При этом широко используются как теоретические, так и экспериментальные методы. Очень сложные и трудоемкие экспериментальные исследования на действующем оборудовании электростанции позволили получить важные данные по характеристикам части низкого давления теплофикационной турбины в режиме малых пропусков пара (В.И. Беспалов, Л.А. Беляев, С.У. Беспалова). Сотрудники кафедры (В.А. Брагин, Б.Ф. Калугин, И.Н. Коновалов) разработали методику проведения эксперимента и от-

работали измерительную систему для определения характеристик конденсатора турбины в малорасходном режиме. Полученные экспериментальные результаты позволяют строить обоснованные математические модели сложных теплоэнергетических систем.

В области разработки нового оборудования плодотворно работал доцент С.В. Положий. Проведенные им экспериментальные исследования позволили получить уникальные результаты по расширению вскипающей воды в соплах и насадках. На основе этих исследований он разработал интересный проект паротурбинной установки. Заслугой научной деятельности С.В. Положего является выполненный анализ режимов работы энергосистем и прогноз изменения показателей тепловой экономичности в условиях переменного режима. Вопросы совершенствования оборудования и режимов его работы исследуются Б.Ф. Калугиным, которым предложены оригинальные решения по структуре тепловых схем паротурбинных установок, позволяющие повысить их тепловую экономичность.

Период освоения в энергетике топочных устройств нового поколения (топки с низкотемпературным вихрем, малогабаритные вихревые топки, камерные топки с многоярусными тангенциальными горелками, топки с кипящим слоем, кольцевая топка, топка с плоскофакельными горелками, вариации пылеприготовительных систем) - 80-е годы - характеризовался уже большим вниманием к изучению проявлений свойств минеральной части угля в различных условиях сжигания, так как была доказана необходимость таких исследований при отработке и апробировании новых конструктивных и технологических решений. На кафедре парогенераторостроения и парогенераторных установок были развернуты натурные исследования на действующих котлах тепловых электростанций (А.С. Заворин, И.И. Федецкий, Е.П. Теплухин, Н.Б. Киселев, А.Н. Жемчугов, Б.В. Лебедев, С.К. Карякин). Особенно большое значение они имели при опытно-эксплуатационных сжиганиях канско-ачинских и других углей, которые выполнялись по координационным программам в порядке межведомственных экспериментов по испытаниям головных образцов котельных агрегатов или по отработке принципиальных положений перспективного проектирования. Такие исследования выполнялись в составе комплексных научных коллективов и при сотрудничестве с представителями Всероссийского теплотехнического института, Центрального котлотурбинного института, Сибирского ВТИ, Уральского ВТИ, Сибтехэнерго, котлостроительных заводов, Таллиннского технического университета и других организаций. Полученные результаты дали основания для проведения исследований по физическому моделированию аэродинамики топочных процессов (И.И. Федецкий, Б.В. Лебедев), процессов в минеральной части под действием газовой среды (И.И. Федецкий, С.А. Михайленко, Л.Г. Захарова), специфики шлакообразования (Г.А. Сарапулов), по математическому (Е.Н. Некряч) и физико-химическому моделированию преобразований в составе пылеугольных частиц (Л.Г. Красильникова, З.П. Мартякова).

В области исследования теплообмена применительно к тепловым расчетам электротехнических устройств интенсивность работ увеличилась с начала 60-х годов, когда были защищены кандидатские диссертации Л.Г. Фуксом, Ю.А. Короленко. Впоследствии по этой тематике под руководством А.С. Ляликова выполнили диссертационные исследования Ю.А. Загромов, Л.С. Коновалова, А.П. Цыганок, А.М. Кирик, П.А. Люкшин, П.П. Шилоносов, Л.Г. Калугина, В.В. Инзель, А.С. Ненишев, а в 80-е годы работа успешно продолжалась применительно к технологии эмалирования проводов (Н.А. Цветков, С.В. Соловьев, Л.Н. Цветкова, Ю.И. Чижик).

Работы по теплофизическим свойствам веществ и материалов, включая создание и усовершенствование методов исследований, получили развитие в 60-е и 70-е годы под руководством Л.Г. Фукса (В.В. Банюха, В.Н. Шмандина, Н.Н. Водопьянова). Созданная экспериментальная база позволяла параллельно вести работы прикладного характера, например, по тепловым режимам сушки древесных изделий (А.П. Заблоцкий).

С 1964 г. сотрудники теплоэнергетического факультета включились в разработку рациональных систем охлаждения бетатронов в рамках развиваемого в ТПУ направления. В разные годы участниками этих исследований были Г.И. Фукс, В.В. Иванов, А.А. Гурченок, Г.Ф. Шилин, А.В. Фурман, В.С. Логинов, М.М. Гекке, Ю.Б. Антонов. Другая группа сотрудников факультета с 1968 года участвует под руководством Ю.А. Загромова в важнейшей тематике по исследованию теплофизических свойств тонкослойных материалов и специальных покрытий в рамках координационных планов Академии наук (Б.З. Токарь, В.В. Куликов, Л.С. Симанин, М.Д. Кац).

Под руководством Г.П. Бойкова, защитившего в 1963 г. докторскую диссертацию, развивались исследования тепломассообмена от высокоэнергетических источников (Ю.В. Видин, В.В. Иванов, В.В. Саломатов). Особенностью этого направления был учет влияния на динамику процессов переменности физических свойств материалов и коэффициентов внешнего переноса. Подобные классы задач характерны для сварочных технологий, металлургии, авиационной и космической техники. В ходе исследований было установлено, что существует особый упорядоченный режим нагрева (охлаждения), свойственный всем видам граничных условий. Качественная зависимость была использована при разработке эффективных экспериментальных методов комплексного исследования теплофизических характеристик веществ в широком интервале температуры.

Исследования в развитие этого направления ве-

лись затем в основном на кафедре теплофизики и атомной энергетики под руководством В.В. Саломатова (А.А. Торлопов, Э.И. Гончаров, Е.М. Пузырев, А.Д. Горбунов, Е.Г. Боберь, А.В. Кузьмин, Ю.Я. Раков, В.Д. Клопотов, А.А. Макеев, Л.Л. Любимова, А.С. Евсиков).

В 70-е годы определенные достижения были получены в разработке методов расчета тепловых режимов трубопроводов магистрального транспорта нефти и газа в климатических условиях Сибири (А.С. Ляликов, А.В. Фурман, Р.П. Дячук, С.А. Карауш).

Ставшие традиционными для ТПУ исследования в 90-е годы приобрели новые тенденции с учетом приоритетных для большой энергетики и регионального топливоиспользования задач, стимулируемых необходимостью улучшения экологических характеристик энергетического производства, поиска резервов ресурсо- и энергосбережения.

Особенности современного этапа энергетики определили выполнение на кафедре парогенераторостроения и парогенераторных установок комплексных исследований исходного состава минеральной части бурых углей (Л.Г. Красильникова) и его преобразования при термической подготовке к сжиганию (Л.Г. Захарова), новых материалов искусственного и естественного происхождения, применимых в ресурсосберегающих и природоохранных технологиях топливоиспользования (А.А. Макеев, Л.Л. Любимова, А.А. Купрюнин, Р.Н.Фисенко), продления срока службы и диагностирования ресурсных характеристик котельных сталей (Л.Л. Любимова, А.А. Макеев, Б.В. Лебедев, А.А. Ташлыков), совершенствования экологических характеристик котлов в условиях эксплуатации (О.И. Будилов, А.К. Курганов). Имеющийся опыт востребован при исследовании технологических характеристик бурых углей Таловского месторождения и других местных топлив Томской области для разработки эффективных методов их использования в энергетических целях (С.К. Карякин, В.И. Николаева, А.В. Казаков, А.В. Визгавлюст, О.А. Ласовская, А.Ю. Долгих, М.Н. Ильина). Перспективы продолжения научного направления связаны с расширением использования компьютерных технологий как в части использования наработанной базы данных для численного моделирования процессов и устройств подготовки и сжигания углей (А.В. Старченко, С.В. Красильников, Н.В. Иванова), так и для создания информационных и экспертных систем (Б.В. Лебедев, Т.С. Тайлашева, Ю.В. Немойкин).

В последнее десятилетие значительные результаты получены в области компьютерного моделирования теплоэнергетических систем. Сюда можно отнести модели отдельных элементов систем, разработанные группой сотрудников кафедры атомных и тепловых электростанций (Л.А. Беляев, А.М. Антонова, В.В. Беспалов, А.В. Воробьев), а также модели сложных систем, позволяющие проводить автоматизированное проектирование теплоэнергетических установок (Н.Н. Галашов, В.В. Беспалов, И.П. Озерова).

Важное значение в современных условиях приобретает решение задач повышения тепловой экономичности источников энергоснабжения в рамках программы энергосбережения, поскольку именно на них осуществляется сбережение энергетических ресурсов. Результативная работа в этом направлении ведется коллективом под руководством зав. кафедрой АТЭС Л.А. Беляева (А.М. Антонова, И.П. Озерова, В.И. Беспалов, А.В. Воробьев, В.В. Беспалов и др.).

Большое внимание в ряде современных отраслей науки и техники, где затруднен доступ к объекту, в том числе из-за опасных условий эксплуатации, уделяется разработкам по неразрушающему бесконтактному дистанционному контролю и определению теплофизических свойств изделий. В свете этой проблемы на кафедре теоретической и промышленной теплотехники создан задел для направления по исследованию распространения тепловых возмущений в телах различной структуры при импульсном подводе энергии к поверхности исследуемого объекта (О.Ю. Троицкий). Результаты работ представлялись на 19-и международных конференциях, в том числе в Австрии, Великобритании, Германии, Корее, США, Японии).

Научно-педагогические школы, у истоков которых в свое время стояли профессора И.Н. Бутаков, Г.И. Фукс, И.К. Лебедев, дали немало докторов и профессоров: И.Я. Конфидератов, В.А. Шваб, В.Т. Юринский, И.А. Яворский, Г.П. Бойков, В.В. Иванов, Ю.В. Видин, В.В. Саломатов, В.М. Лебедев, Ю.А. Маракулин, А.Д. Горбунов, С.А. Михайленко, С.В. Соловьев, Н.А. Цветков, С.А. Карауш. Современные научные интересы сотрудников, аспирантов и студентов теплоэнергетического факультета продолжают 80-летнюю историю этих научных школ.